

SIMULATION DE CONTRÔLES PAR RADIOGRAPHIE DANS CIVA

SIMULATION STUDIES OF RADIOGRAPHIC INSPECTIONS WITH CIVA

J. Tabary ⁽¹⁾, P. Hugonnard ⁽¹⁾, A. Schumm ⁽²⁾, R. Fernandez ⁽³⁾

⁽¹⁾ CEA-LETI, centre de Grenoble, 17, Rue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9
joachim.tabary@cea.fr
patrick.hugonnard@cea.fr

⁽²⁾ EDF R&D-SINETICS,
1 avenue du Général de Gaulle – 92141 CLAMART
Tél. 01 47 65 49 44 – Fax. 01 47 65 34 99
E-Mail : andreas.schumm@edf.fr

⁽³⁾ CEA, LIST, centre de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette
Tél. 01 69 08 83 02
roman.fernandez@cea.fr

Résumé

Un nouveau module de simulation des contrôles par radiographie gamma ou X a été intégré à la plate forme logicielle CIVA et vient compléter les modules ultrasons (US) et courants de Foucault (CF) déjà existants. Ce module s'appuie sur une combinaison des modèles développés au CEA LETI et à EDF R&D. Le rayonnement direct est calculé de manière analytique (lancer de rayons et loi de Beer-Lambert pour l'atténuation) tandis que le rayonnement diffusé est pris en compte par des calculs Monte-Carlo. Différents types de sondes, gamma ou rayons X, et de détecteurs, peuvent être modélisés. Le module utilise les interfaces métiers de CIVA communes aux techniques US et CF. Il permet de simuler le contrôle de pièces dont la géométrie est importée par CAO et de rendre compte de la présence de défauts de géométrie canonique ou bien définis également par CAO. Dans cette communication, après avoir décrit les modèles appliqués, les possibilités de la simulation du contrôle radiographique sont illustrées sur des cas d'application pratique.

Abstract

A new gamma or X-Ray simulation module has been integrated to the CIVA software and completes the already available UT and ECT. This module is based on a combination of NDT radiographic modules developed at the CEA LETI and at EDF R&D. Direct radiation is calculated from an analytical way (ray tracer and Beer-Lambert law for the attenuation) while the scattered radiation is taking into account from Monte-Carlo modelling. Different types of probes, gamma or X-rays, and detectors can be simulated. X ray module exploits the same dedicated Graphical User Interface mutual to UT and ECT techniques. It allows simulated control of specimens where the geometry can be imported from a CAD tool and also to put in evidence the presence of defects with canonical geometries or also defined from a CAD tool. In this article, after having described the different models used, the X-Ray simulation possibilities are illustrated on different practical applications.



1 - INTRODUCTION

La radiographie est utilisée comme moyen de contrôle non destructif dans un champ d'application très vaste allant du domaine des industries métallurgiques aux circuits primaires et secondaires des réacteurs à eau pressurisée. Pour permettre la démonstration de performance d'inspections radiographiques et pour optimiser les procédures de contrôle dans des zones particulièrement délicates à inspecter, l'utilisation d'un logiciel de simulation s'avère être d'une grande utilité [1]. Dans ce cadre un nouveau module des contrôles par radiographie gamma (source radioactive) ou X (tube RX) a été intégré à la plate forme logicielle CIVA venant compléter les modules US et CF déjà existants. Il permet la simulation d'une chaîne de contrôle radiographique complète (source, objets, défauts, détecteur) avec un potentiel d'utilisation varié tel que l'évaluation de la sensibilité de la détection d'éventuels défauts, l'aide à l'élaboration de maquettes pour END (Essais Non Destructifs) sur site, mais également l'évaluation de détecteurs, de tel ou tel type de source. Ce nouveau module s'appuie sur une combinaison des modèles développés au CEA LETI (logiciel SINDBAD) et à EDF R&D (logiciel MODERATO).

La première partie de cet article présente le fonctionnement général du logiciel en décrivant les modèles appliqués, puis les possibilités de la simulation RX sont illustrées sur des cas d'application pratique.

2 – MODELES APPLIQUES

Le module de simulation des contrôles par radiographie intégré dans CIVA s'appuie sur l'implémentation de deux codes déjà existants : le logiciel SINDBAD [2] développé au CEA LETI et le logiciel MODERATO [3] développé à la R&D d'EDF. A partir de ces deux modèles il est directement possible, sous CIVA, d'effectuer des contrôles soit à partir de sources RX émettant des spectres continus, soit à partir de sources gamma créées par des désintégrations spontanées d'éléments radioactifs tels que l'Iridium ou le Cobalt émettant des spectres discrets de raies. Cette différenciation est à l'origine de l'implémentation de ces deux codes dans CIVA RX. L'IHM est commune aux deux modèles, une option présente dans le panneau correspondant à la modélisation de la source permet de passer d'une source RX à gamma. Le passage de la gestion des spectres continus aux spectres de raies gamma fait automatiquement basculer le modèle de calcul de SINDBAD vers MODERATO. La gestion des spectres RX permet de manipuler des données issues des tables de Birch et Marshall ou d'autres sources, d'effectuer des interpolations sur ces spectres et de les visualiser sous forme de courbes. Un module permet de simuler le spectre de tubes X dont la haute tension est comprise entre 30 et 500 kV [4] [5]. Le modèle de source gamma est implémenté dans le code avec trois sources directement prédéfinies : Co 60, Ir 192 et Se 75. Il est de plus possible de modéliser d'autres types de sources à partir d'un éditeur de source en entrant comme paramètres l'énergie de chaque raie d'émission et le nombre de photons par désintégration

Pour les gammes d'énergie considérées les types d'interactions prépondérantes sont l'absorption photoélectrique, la diffusion Compton, et la diffusion Rayleigh (et dans une moindre mesure la création de paires). La probabilité de chaque type d'interaction dépend de l'énergie incidente des photons traversant la matière, de la densité et de l'épaisseur de la matière traversée. Cette probabilité correspond à la section efficace de chaque type d'interaction.

Aux basses énergies l'absorption photoélectrique, interaction prédominante, correspond à l'annihilation d'un photon dans la matière. Ce photon est absorbé et transfère toute son énergie à un électron du cortège atomique qui sera alors éjecté.

La diffusion Rayleigh se produisant à basse énergie est le résultat d'une interaction élastique du photon incident avec un électron lié engendrant une modification de la direction de propagation du photon.

La diffusion Compton correspond à une interaction inélastique engendrant une perte d'énergie et une modification de la direction de propagation du photon.

Enfin la dernière interaction, non simulée dans CIVA à partir de sources radioactives et pouvant être négligée à des énergies typiques de CND, correspond à la création de paires électron-positron après interaction du photon incident avec un atome. Cette interaction ne peut avoir lieu qu'à une énergie supérieure de 1.022 MeV (deux fois la masse de l'électron) et la probabilité d'avoir lieu sera d'autant plus importante que l'énergie sera élevée.

On distingue pour le calcul deux familles de trajectoires de photons : d'une part ceux qui n'ont pas interagi avec la matière en la traversant entre la source et le détecteur (photons directs) et d'autre part ceux qui interagissent avec la matière (photons diffusés). Si on calculait indépendamment la trajectoire de chaque photon, il serait inconcevable de pouvoir simuler de manière réaliste, en un temps raisonnable la totalité des photons émis par une source physique. Le nombre de photons calculables ne pouvant atteindre celui d'une exposition réelle ; les images du direct et du diffusé obtenues, en prenant en compte moins de photons que la source n'en émet, sont alors « bruitées » ne permettant pas de distinguer de petits détails dans l'ensemble de la géométrie inspectée. Pour obtenir un résultat de simulation avec un temps de calcul acceptable, tout en prenant en compte le rayonnement diffusé, le code combine deux modèles physiques: un modèle analytique d'atténuation exponentielle, appelé méthode Beer-Lambert une méthode Monte-Carlo calculant le rayonnement diffusé. La combinaison de ces deux méthodes permet alors d'obtenir une image finale réaliste, détaillée, prenant en compte toute la physique interaction photons-matière et réalisable sur un ordinateur commun et ce malgré le déficit de plusieurs ordres de grandeurs en termes de nombre de photons traités.

- le modèle analytique est utilisé pour calculer les images issues du rayonnement direct et ne prend en compte que la part de photons n'ayant pas interagi avec la matière sondée. Cette méthode ne prend donc en compte que le rapport entre le nombre de photons émis par une source et le nombre de photons sortant de la pièce sans avoir subi d'interaction. La loi, dite loi de Beer-Lambert est une loi d'atténuation exponentielle prenant en compte la section efficace totale d'interaction et l'épaisseur de la matière traversée (équation 1). L'image obtenue de l'objet est très détaillée et donc apte à faire ressortir les détails les plus fins. Cependant ce résultat, bien que pouvant s'avérer suffisant pour des objets fins et peu denses et demandant un temps de calcul peu coûteux, ne prend pas en compte la contribution du rayonnement diffusé.

$$I(E)/I_0(E) = \exp(-\mu(E)x)$$

Equation 1: loi d'atténuation des photons dans la matière, I_0 représente l'intensité initiale, x l'épaisseur traversée et μ le coefficient total d'atténuation

- pour prendre en compte ce rayonnement diffusé, un second modèle prend le relais de celui mentionné précédemment. Cette méthode, dite méthode Monte-Carlo (par référence aux jeux de hasard à Monte-Carlo), évalue les images de l'objet formées par les rayonnements direct et diffusé. Elle calcule le trajet de chaque photon modélisé au cours de son trajet dans la matière en prenant en compte tous les types d'interaction photons-matière et le libre parcours moyen d'un photon à partir des méthodes probabilistes

La combinaison des deux modèles (analytique et probabiliste) consiste à réaliser successivement la simulation analytique (pour le rayonnement direct), la simulation Monte-Carlo, la mise à niveau de l'image Monte-Carlo du diffusé, et la combinaison des deux images. Une méthode de lissage sur le détecteur est appliquée pour reproduire les variations ponctuellement faibles du rayonnement diffusé. Ce processus de formation de l'image est décrit dans [6] et [7]. Le modèle de simulation du rayonnement du diffusé implémenté dans

la partie modélisation de source radioactive, ne prend pas en compte la production de paires il n'est donc pas recommandé de simuler des sources de très haute énergie. Cette interaction peut cependant être négligée à des énergies correspondant aux sources Cobalt ou Iridium.

Une fois les trajectoires des photons calculées, il faut modéliser leurs interactions avec le détecteur. Tout comme les modèles de génération de photons (sources), les modèles de détecteurs sont actuellement propres à chaque logiciel de simulation radiographique implémenté dans CIVA. A partir du modèle de simulation de tube à rayons X, plusieurs modèles de détecteurs sont implémentés : détecteur standard, scintillateur + CCD, et cassette-film. Des modèles de bruit, de FTM (Fonction de Transfert de Modulation pour simuler le flou ajouté dans les images qui est dû au détecteur du système) et de flous de foyers sont également disponibles de façon à estimer de manière très réaliste la détectabilité de défauts dans une radiographie.

Dans le cas de la simulation de tests radiographiques à partir de sources gamma, les détecteurs simulés sont des films trouvant une application directe dans la radiographie industrielle. La modélisation de ces films nécessite la conversion à la fois du rayonnement se déposant sur le détecteur, de l'atténuation et du diffusé obtenu par la pièce inspectée en densité optique suivant les caractéristiques propres de chaque film industriel. Pour modéliser ces films et cette physique la norme EN584 est utilisée comme modèle [8].

3- ILLUSTRATION DES POSSIBILITES DE LA SIMULATION RX

Le module de simulation en radiographie CIVA RX tout comme le reste du logiciel CIVA fonctionne sur un PC Windows classique (XP ou vista) et possède l'avantage de présenter les mêmes interfaces que les modules CIVA US (modélisation ultrasonore) et CIVA CF (modélisation par courants de Foucault). L'IHM permet la visualisation de la scène géométrique (source, objet, détecteur) et de la même manière que les autres modes d'inspections implémentés dans CIVA, tout est positionné par rapport à la pièce à inspecter. L'avantage d'un code commun regroupant trois méthodes prédominantes dans le CND est d'autoriser une comparaison immédiate de simulation entre ces modes d'inspection. Cette présence d'interface commune aux trois méthodes d'inspection permet aisément de réaliser des configurations identiques en UT et RT par exemple et de bénéficier des images CIVA.

Une des particularités de CIVA est la possibilité de créer des géométries complexes :

- soit directement à partir de l'interface graphique en choisissant la géométrie à inspecter parmi une liste d'objets paramétriques tels des pièces planes, cylindriques, coniques, coudes, piquages... (Figure 1b).
- soit à partir d'un outil CAO 2D intégré à CIVA. Une pièce complexe est alors définie par un profil dont l'extension 3D est réalisée par une révolution ou une translation du profil. (Figure 1a).
- Soit par un outil de CAO décrivant des pièces CAO 2 ou 3D importées ensuite dans CIVA sous format facettisé (figure 1c). (Format DXF ou IGES).

Les figures ci-dessous montrent quelques exemples de visu 3D de configurations RX paramétrées sous CIVA (le cône bleu représente l'angle d'ouverture de la source, le détecteur est positionné sous la pièce à inspecter).

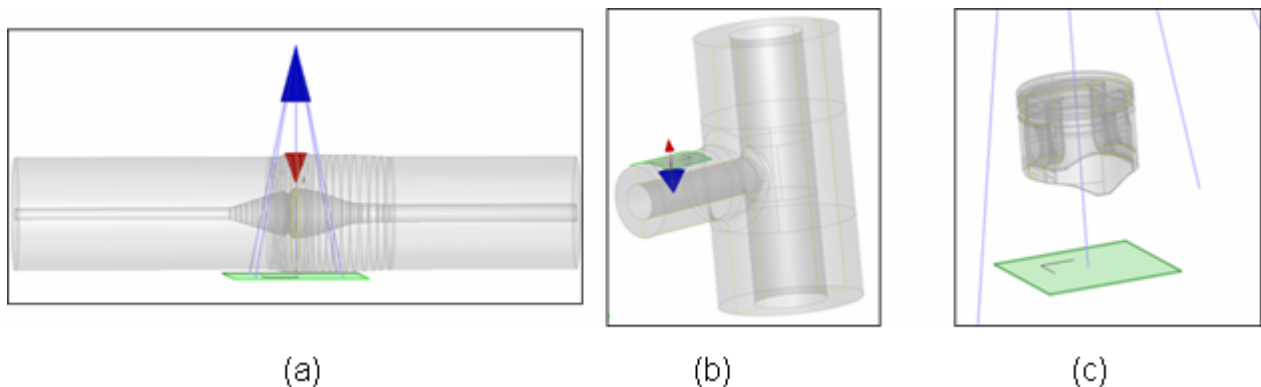


Figure 1: (a) Exemple d'une soudure créée à partir de l'éditeur CAO 2D disponible sous CIVA, (b) exemple d'un objet paramétrique disponible directement dans CIVA, (c) exemple d'une pièce CAO 3D importée par un outil de CAO externe.

Une large gamme de matériaux est disponible sous CIVA permettant de définir à la fois la pièce et les défauts insérés dans cette pièce. La gestion des matériaux est basée sur les données de Storm et Israël [9]. Il est également possible de créer des alliages et de calculer les coefficients d'atténuation de ces matériaux en paramétrant la proportion de chaque élément composant cet alliage (ou le nombre d'atomes de chaque élément) et la densité. Une fois homogénéisé il est possible de directement visualiser la courbe d'atténuation totale de ce matériau (en cm^2/g) en fonction de l'énergie incidente des photons.

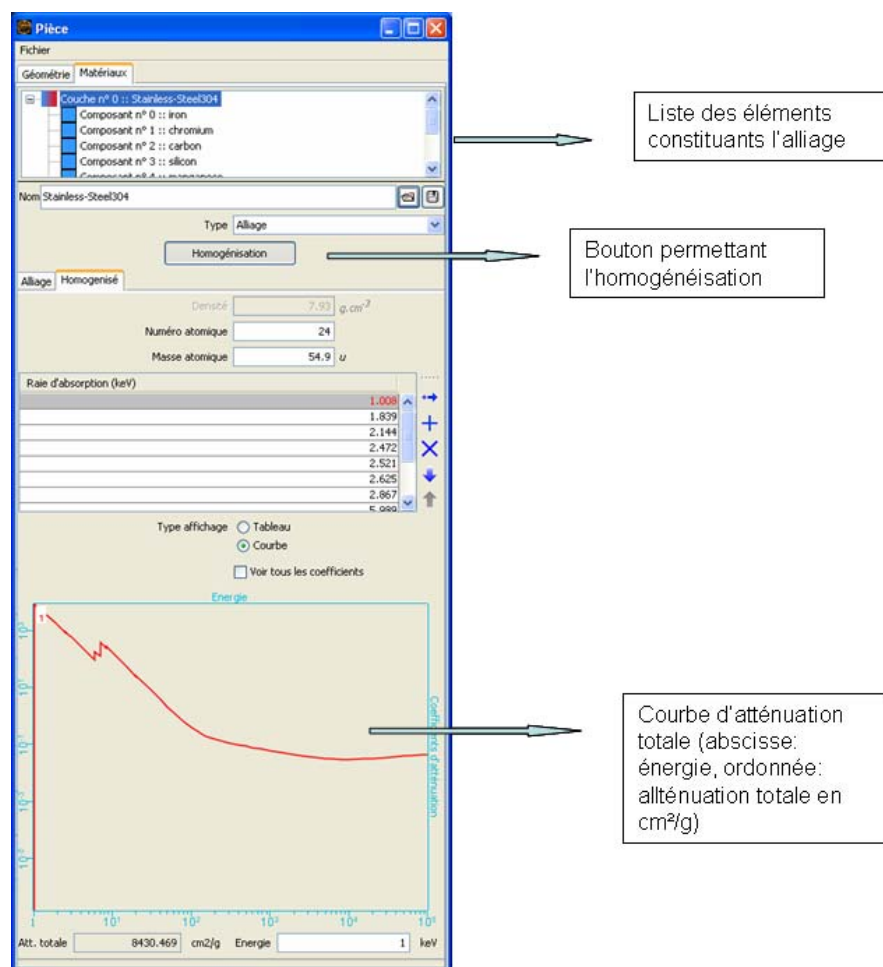
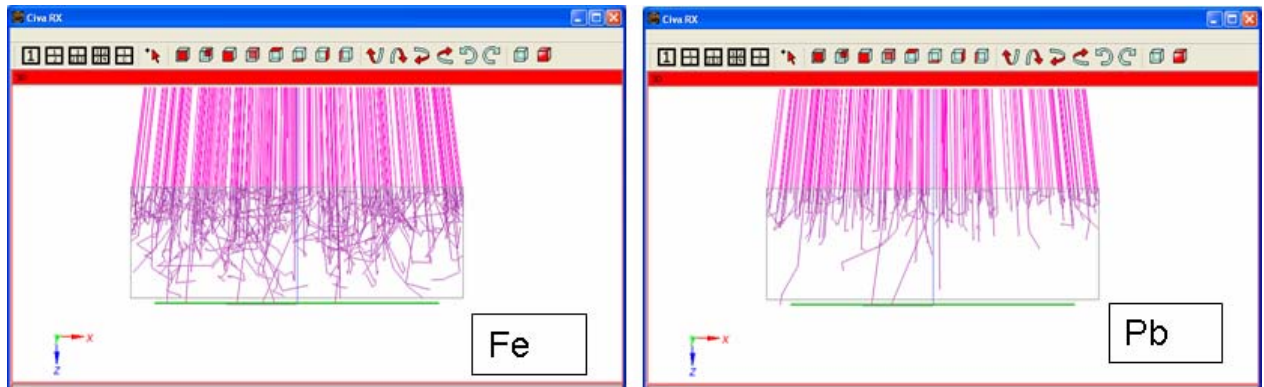


Figure 2: courbe d'atténuation obtenue à partir de la création d'un alliage dans CIVA

Une fois la chaîne radiographique configurée, une fonctionnalité permet de voir et comprendre le comportement des photons dans la pièce irradiée. Cette fonctionnalité, nommée « trajets de photons » permet d'appréhender rapidement, avant même de lancer un calcul pouvant s'avérer long, l'influence de l'épaisseur, de la densité du matériau et de l'énergie de la source. Par exemple, dans les cas de blocs de fer et de plomb présentés ci-dessous, on visualise la propagation de photons à partir de deux sources gamma différentes.



(a) Co 60



(b) Ir 192

Figure 3 : Visualisation du comportement des photons selon leur énergie et le matériau traversé. Les sources sont des sources radioactives (a) Co et (b) Ir. La pièce correspond, dans chaque cas, à un bloc en fer ou en béton (respectivement à gauche et à droite).

CIVA RX permet d'effectuer des calculs utilisant le modèle analytique seul, le modèle Monte-Carlo seul et des calculs combinant les deux modèles. Suivant le choix défini par l'utilisateur, une sauvegarde des images issues des différents modèles est faite.

Un outil d'export des images permet d'exporter l'image obtenue directement vers la scène géométrique ou au format TIFF.

- En mode analytique trois images de la pièce inspectée peuvent être visualisées. Ces images correspondent à la densité optique si le détecteur est un film (niveau de gris pour les autres détecteurs), à l'énergie déposée sur chaque pixel, et enfin à la valeur de l'atténuation correspondant au logarithme du rapport Intensité reçue / Intensité émise.

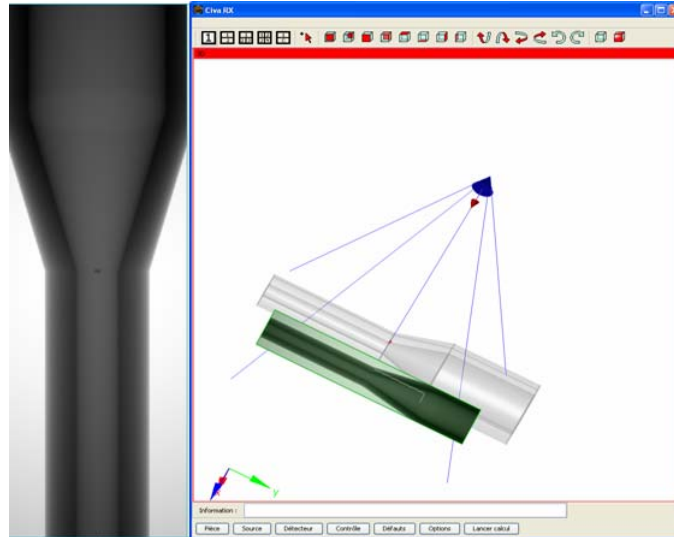


Figure 4 : Résultats du calcul analytique (contribution du rayonnement direct seul) pour une tuyauterie contenant une inclusion au niveau du manche.

- A partir d'un calcul Monte-Carlo uniquement, les images extraites du calcul correspondent au rayonnement direct, au rayonnement diffusé et à la combinaison du direct et du diffusé Monte-Carlo. La figure 4 illustre les trois images d'un calcul Monte-Carlo sur la tuyauterie précédente. Cette simulation a été réalisée avec 1 milliard de photons. Ce calcul Monte-Carlo permet de quantifier l'effet du rayonnement diffusé sur le détecteur.

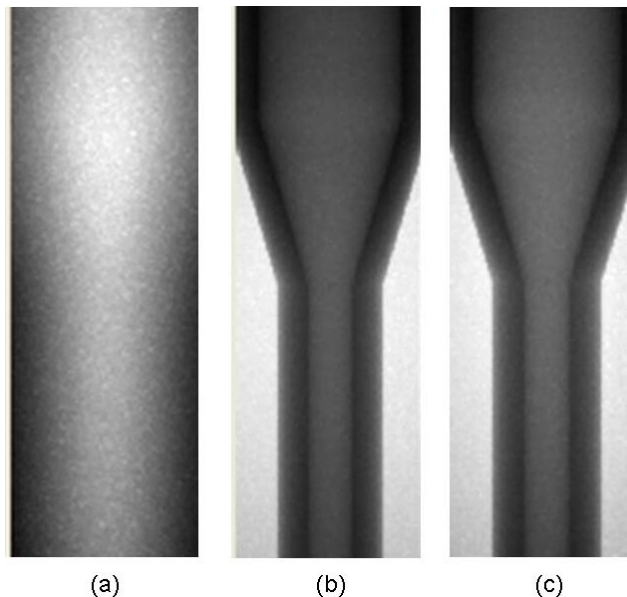
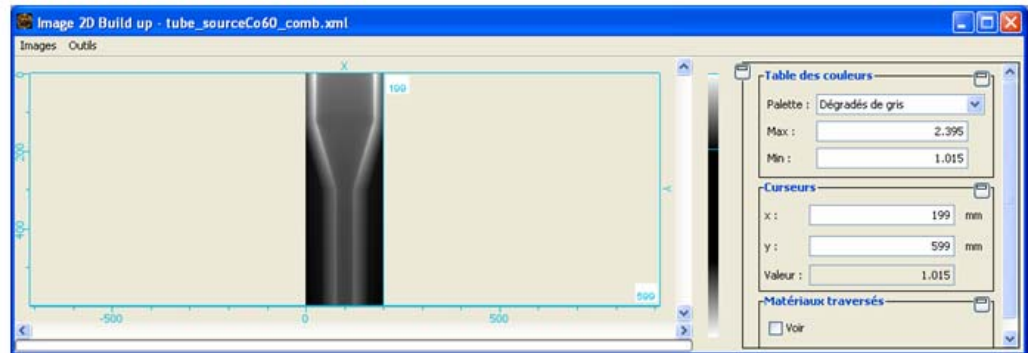


Figure 5 : Résultats du calcul Monte-Carlo pour la même tuyauterie que celle représentée dans la figure 4. (a): contribution du rayonnement diffusé uniquement, (b) : contribution du rayonnement direct seul, (c) : somme des contributions du direct et du diffusé.

- Enfin, le mode combinaison, traitant à la fois le rayonnement direct par calcul analytique et le rayonnement diffusé (et direct en gamma) par la méthode Monte-Carlo permet d'obtenir l'image finale réaliste. De plus une cartographie du Build-Up ($1 + \text{diffusé/direct}$) est tracée. La qualité de l'observation d'un défaut dépendant du rayonnement direct, ce facteur permet d'observer les zones où un défaut pourra être détecté avec plus ou moins de précision. L'indication de défaut sera d'autant meilleure que le Build-Up sera proche de 1. A partir de cette cartographie il est donc possible d'évaluer et d'optimiser une procédure de contrôle et de quantifier la part et l'effet du rayonnement diffusé.



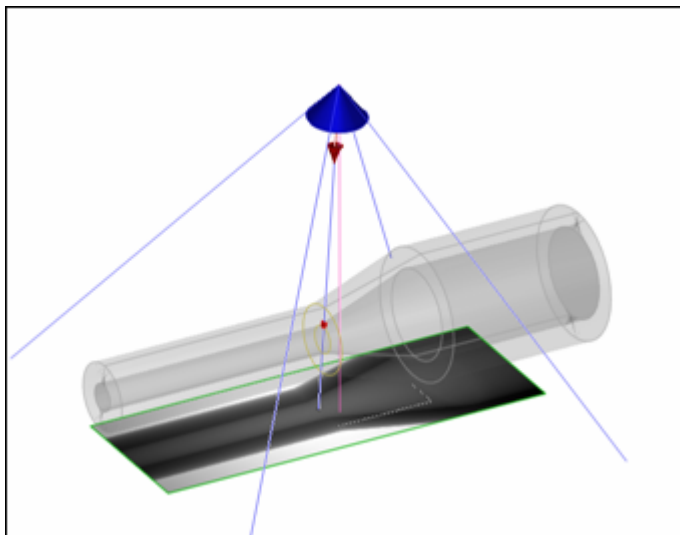
(a)



(b)

Figure 6 : (a) image finale correspondant à la combinaison, (b) : cartographie du Build-Up.

Toutes les images obtenues après calculs possèdent une fenêtre à droite du résultat informant sur les valeurs minimales et maximales obtenues, la valeur en un point défini avec des curseurs et présente également un outil interactif d'évaluation des distances traversées dans les différents matériaux. Un rayon apparaît directement sur la scène géométrique principale de CIVA et varie en fonction de la position du curseur sur l'image.



Matériaux traversés	
<input checked="" type="checkbox"/> Voir	
void	607.57
aluminium	31.8
void	41.64
aluminium	32.186
void	57.124

Figure 7 : liste des matériaux et de l'épaisseur traversée par le rayon défini par la coordonnée d'impact (mm) appliqué à un tube en aluminium contenant une inclusion. L'information est obtenue le long de la ligne rose partant de la source jusque sur le détecteur.

4-CONCLUSION

Dans cet article, nous avons effectué une présentation du nouveau module de simulation des contrôles par radiographie gamma ou X intégré au logiciel CIVA. Les modèles SINDBAD (CEA LETI) et MODERATO (EDF R&D) développés et intégrés très récemment dans CIVA

ont participé à de nombreuses campagnes de validation menées depuis plusieurs années dans le cadre de la démonstration des performances lors des qualifications des applications d'END. Dans le cadre de la validation des procédures de contrôles en radiographie, les études et tests se sont appuyés à la fois sur une argumentation théorique et sur une argumentation pratique via la comparaison avec d'autres logiciels et avec des résultats expérimentaux.

CIVA RX s'avère donc être très utile dans le cadre de la démonstration de performance des procédures de contrôle radiographiques, mais également utile pour la conception et l'optimisation de tube à rayons X et la mise en évidence de phénomènes physiques simples en radiographie et interaction photons-matière.

Dans le cadre de la prochaine version CIVA 10 et surtout du projet ANR RADIOLA, ce module de simulation continue à se développer et élargir son champ d'application.

5-REFERENCES

- [1] P. Hugonnard, V. Mengeling, T. Jacques, « Identification 3D de zones radiographiques », COFREND 2005.
- [2] R. Guillemaud, J. Tabary, P. Hugonnard, F. Mathy, A. Koenig, A. Glière, "Sindbad: a multi-purpose and scalable X-ray simulation tool for NDE and medical imaging", PSIP 2003, Grenoble, France, 2003.
- [3] O. Bremnes, « Etudes paramétriques quantitatives en radiographie avec le logiciel de simulation MODERATO », COFREND 2006.
- [4] R. Birch and M. Marshall, "Computation of bremsstrahlung X-ray spectra and comparison with spectra measured with a Ge(Li) detector.", Phys. Med. Biol. 24 (3), 1979.
- [5] Tucker, G.T. Barnes & D.P. Chakraborty, "Semiempirical model for generating tungsten X-ray spectra." Med. Phys. 18 (2), 1991.
- [6] A. Schumm, O. Bremnes, B. Chassignole, « Numerical simulation of radiographic inspections: fast and realistic results even for thick components » Proceedings of the 16th world conference of Non-Destructive Testing, Montreal, août 2004
- [7] J. Tabary, A. Glière, R. Guillemaud, P. Hugonnard, F. Mathy, « Combination of high resolution analytically computed uncollided flux images with low resolution Monte Carlo computed scattered flux images », IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 51, No. 1, pp 212-217, Feb 2004
- [8] A. Schumm, U. Zscherpel, „The EN584 standard for the classification of industrial radiography films and its use in radiographic modelling”, in Proceedings of the Sixth International Conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components, 2007
- [9] E. Storm, H.I. Israël, « photons cross-sections from 1 KeV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100 », Nuclear Data Tables, A7, 565-681